



## Distribución de tensiones en fachadas de azulejos sujetas a dilataciones térmicas

M. MARRERO, A. RAMÍREZ DE ARELLANO, Y R. LUCAS RUIZ

Departamento de Construcciones Arquitectónicas II, Universidad de Sevilla, Sevilla, Spain

Los azulejos son ampliamente utilizados como revestimiento de fachadas en las edificaciones ya que poseen cualidades importantes como pueden ser su reducida necesidad de mantenimiento periódico y su alta resistencia a condiciones ambientales agresivas, pero también presentan diversas limitaciones. La patología más común y que más problemas genera en una fachada de azulejos es la rotura del vidriado. En muchos casos el problema tiene su origen en las fuertes variaciones de la temperatura exterior a las que se ven sometidas las fachadas.

En el presente trabajo se estudian las tensiones en los elementos más exteriores de una fachada, revestida con piezas cerámicas vidriadas sometidas a una dilatación térmica, mediante un modelo de elementos finitos que permite calcular y representar la distribución de tensiones que se generan, a la vez que se identifican las zonas que alcanzan los niveles de esfuerzo más altos. Se han modelado dos geometrías encontradas en la cerámica moderna y tradicional para comprobar como estas últimas abordan el problema de concentración de tensiones mediante soluciones sencillas que pueden ser fácilmente reproducibles en la actualidad.

*Palabras clave:* Azulejos, fachadas, revestimientos, dilatación térmica, elementos finitos

### Tile facades thermal stress analysis

Tiles have been widely used in building facades due to important qualities such as little maintenance needed and high performance under aggressive environmental conditions, but tiles also present some limitations. One among them is that tile glaze breaks after collocation, usually due to the high temperature range facades undergo.

The present work studies the stresses that take place in a tile facade when is submitted to high temperature variation. Special emphasis in the analysis is taken on the outer system elements. The problem is represented by means of a numerical solution using the Finite Element Analysis. Two different geometrical shapes commonly found have been modeled, a square tile with straight border and square tiles with a beveled edge.

*Keywords:* Tiles, facades, tiling, thermal expansion, finite elements

### 1. INTRODUCCIÓN

Los azulejos se han empleado como revestimiento de fachadas en las edificaciones a lo largo de los siglos por ofrecer ventajas frente a otras opciones, como puede ser el caso de su reducida necesidad de mantenimiento periódico y su alta resistencia a diferentes condiciones ambientales (1). Sin embargo, junto a sus indudables ventajas, también presentan diversas limitaciones (2). Alguna de ellas se deben, sin duda, a las características que identifican el material, pero otras dependen en gran medida del empleo de mano de obra escasamente cualificada en los procesos de ejecución de los alicatados, de la incorrecta selección de los materiales de fijación (3) y, en ocasiones, incluso a la mala selección del propio azulejo.

Las patologías más comunes y que más problemas genera en una fachada de azulejos son el desprendimiento de éstos después de colocados y la rotura del vidriado en el perímetro de las piezas, figura 1. En muchos casos el problema tiene su origen en las fuertes variaciones de la temperatura exterior a las que se ven sometidas las fachadas (4). Este problema, aún cuando es sobradamente conocido, no se ha estudiado con el suficiente rigor como para identificar con claridad todas sus características. Son prácticamente inexistentes los estudios relacionados con el análisis de las tensiones que se generan en

el conjunto de elementos que dan forma al sistema: fábrica de ladrillo, adhesivo y azulejo, cuando el mismo está sometido a cargas cíclicas originadas por variaciones en la temperatura exterior.

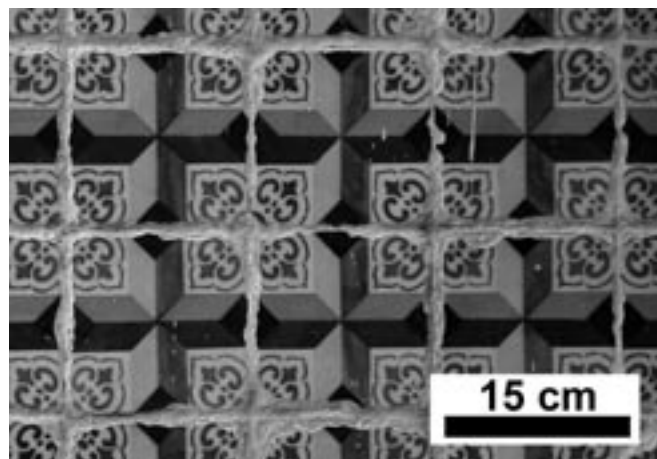


Fig. 1.- Foto de una fachada de azulejos en la que ha saltado el vidriado de los azulejos

Se han realizado por otros autores diversos estudios sobre las fachadas de azulejos que van desde el desarrollo pruebas no destructivas que permiten identificar patologías (5, 6, 7) hasta la experimentación con distintos tipos de adhesivos y morteros sometidos dilataciones térmicas (8, 9, 10). En los trabajos realizados también se ha recurrido a modelos numéricos como es el caso del Método de los Elementos Finitos (MEF) (11). Entre dichos trabajos cabe destacar los desarrollados por los autores: Naniwa y coaut. (12) y Bowman y coaut. (13), quienes emplean el MEF para resolver un modelo bidimensional de una fachada de azulejos expuesta a altas temperaturas.

Los trabajos antes mencionados no incluyen en el modelo del sistema el vidriado del azulejo, por lo que sus modelos se aproximan más al estudio de baldosas cerámicas, que se comportan de forma diferente ante altas temperaturas que el azulejo tradicional. Por ello, en el presente trabajo se ha incluido como elemento del sistema en estudio, el vidriado y el material de agarre. Se comparan los comportamientos del sistema utilizando como material de agarre un mortero con una dosificación estándar y distintas geometrías de bizcocho y vidriado.

El presente trabajo es continuación del comenzado por los autores (14) en el estudio de las tensiones en los elementos más exteriores de una fachada revestida con piezas cerámicas vidriadas que está sometida a altas temperaturas. Mediante un modelo de elementos finitos, utilizando la herramienta comercial ANSYS, se calculan y representan la distribución de tensiones que se generan en los elementos del sistema, a la vez que se identifican las zonas que alcanzan los niveles de esfuerzo más altos.

**2. MODELO**

Una fachada alicatada suele estar formada por diversas capas dependiendo de la solución constructiva aplicada en el cerramiento. En la solución más común las capas más exteriores se componen de fábrica de medio pie de espesor, casi siempre de ladrillo perforado, revestida con alicatado de azulejos de diversas dimensiones, recibidos con morteros, preferiblemente de cal, o con adhesivos de diversa naturaleza aplicados sobre enfoscados con mortero de cemento (15).

En el modelo estudiado en este trabajo hemos elegido como solución tipo, una fachada alicatada con azulejos, bizcocho y vidriado, de 15 x 15 cm recibidos con mortero de cal, resuelto con los materiales cuyas propiedades mecánicas se resumen en la Tabla I (6, 16), y fábrica de ladrillo perforado de medio pie de espesor. La fachada en alzado se supone formada por una

TABLA I. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS COMPONENTES DEL SISTEMA

Propiedades	Azulejo	Vidriado	Mortero	Fábrica
Módulo de elasticidad (GPa)	59	63	24.5	24.5
Módulo de Poisson	0.19	0.20	0.17	0.17
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	2.3	2.7	2.3	2.3
Expansión térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	7.5	3.25	12	12

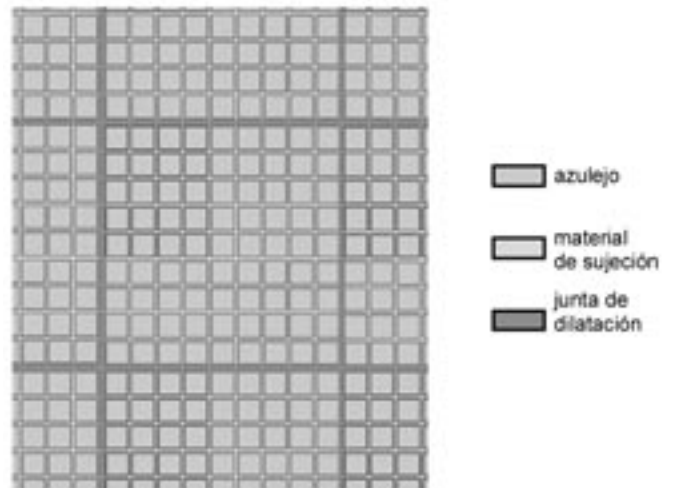


Fig. 2.- Modelo de una fachada de azulejos formada por azulejos de 15 cm x 15 cm y juntas de dilatación separando paños de 9 x 9 azulejos

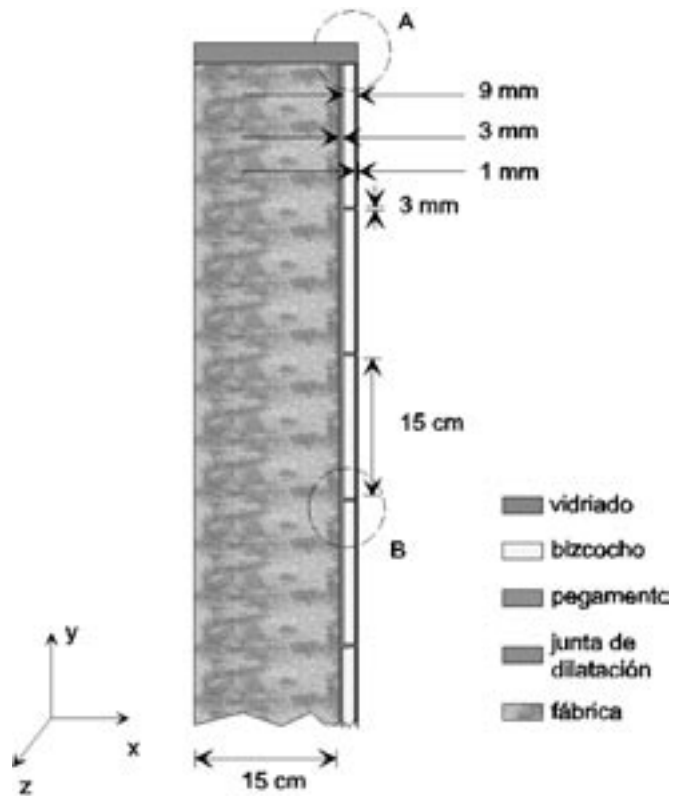


Fig. 3.- Modelo bidimensional de una fachada de azulejos, la zona "A" representa el encuentro del paño de azulejos con la junta de dilatación y la zona "B" la llaga entre azulejos

retícula definida por módulos cuadrados de dimensiones 9 x 9 azulejos (1.59 x 1.59 m), delimitados por juntas de dilatación de material blando, figura 2, el material blando posee un módulo elástico muy inferior al resto del sistema y se ha representado como un contorno libre de tensiones. El entorno así definido, a efectos de la aplicación del MEF, presenta dos planos de simetría que permiten modelar el sistema como un problema de geometría bidimensional, cuyas dimensiones se muestran en la figura 3. En cuanto a la distribución de temperaturas, el sistema se encuentra a una temperatura de

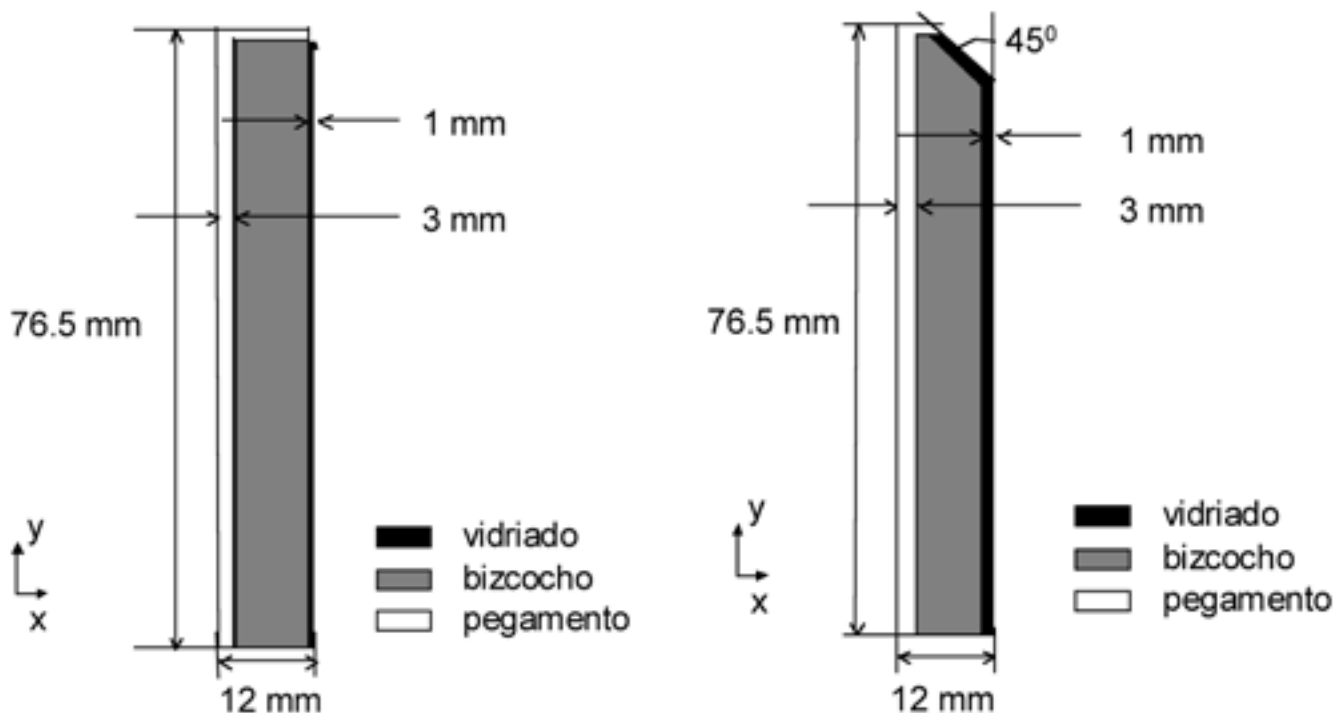


Fig. 4.- Modelo simplificado de medio azulejo, bizcocho y vidriado, y pegamento: (a) azulejo común y (b) azulejo con bisel a 45°

referencia de 20°C y la superficie exterior del sistema a 50°C. La distribución de temperaturas es calculada por el propio programa de elementos finitos que se representa mediante una condición de contorno de 50° en los nodos de la malla más externos que representan la cara exterior de la fachada, y el interior de la fachada con nodos a 20°.

De este modelo preliminar se obtiene que en los azulejos alejados de la junta de dilatación poseen un comportamiento simétrico de las tensiones justo en su centro de la pieza y también en el centro de las llagas entre azulejos (14). Dichos resultados permiten simplificar el problema a medio azulejo, en el cual se puede modelar con facilidad el vidriado. También se encontró en el modelo preliminar que los desplazamientos en la fábrica de ladrillos no son significativos cuando se comparan con los que ocurren en los azulejos, lo cual permite una simplificación adicional, representar la fábrica de ladrillos con una condición de contorno de desplazamientos nulos.

Todo lo anterior nos lleva a analizar de forma sencilla dos geometrías comúnmente encontradas en los azulejos actuales. Definimos como azulejo común a la geometría que más se utiliza en la actualidad, figura 4a, en la que el vidriado tiene una terminación suave en los bordes que hemos definido con un radio de curvatura de 1 mm, igual al espesor del vidriado. En la figura 5a se muestra la malla de elementos finitos, en la que se emplean elementos cuadriláteros y triangulares, de ocho y seis nodos, respectivamente, con dos grados de libertad, en tensión plana. Y la segunda geometría corresponde al azulejo tradicional, figura 4b, en el cual los bordes están biselados. En éste último el bisel está a 45° con respecto al vidriado de la zona plana del azulejo, terminando el bisel prácticamente a la mitad del espesor del bizcocho. En la figura 5b se muestra la malla empleada, los elementos son del mismo tipo que los empleados en el modelo anterior.

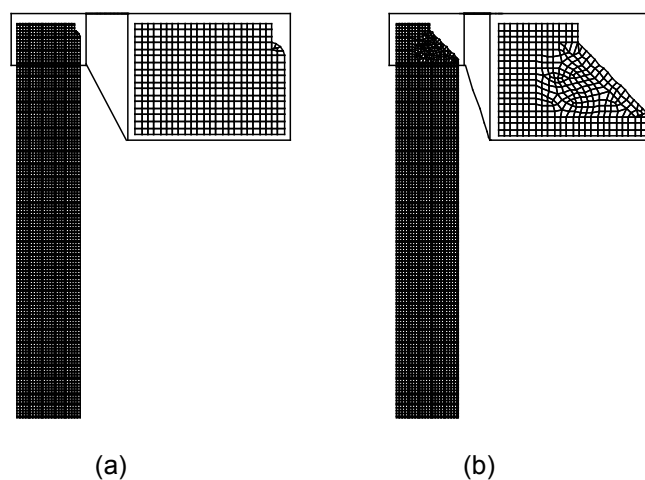


Fig. 5.- Malla de elementos finitos: (a) azulejo común y (b) azulejo con bisel

### 3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos del modelo numérico describen comportamientos de las tensiones que explican varias patologías comúnmente halladas en las fachadas de azulejos. Comenzaremos discutiendo los resultados que corresponden al azulejo común. En el caso de las tensiones en la dirección "x", las más altas tanto en compresión como en tracción ocurren en torno a la llaga entre azulejos, figura 6, siendo esta zona la más crítica. En el caso de las tracciones, la máxima es de 2.86 MPa, aparecen cerca de donde el vidriado se encuentra con las llagas entre azulejos pero no justo en el borde, sino en

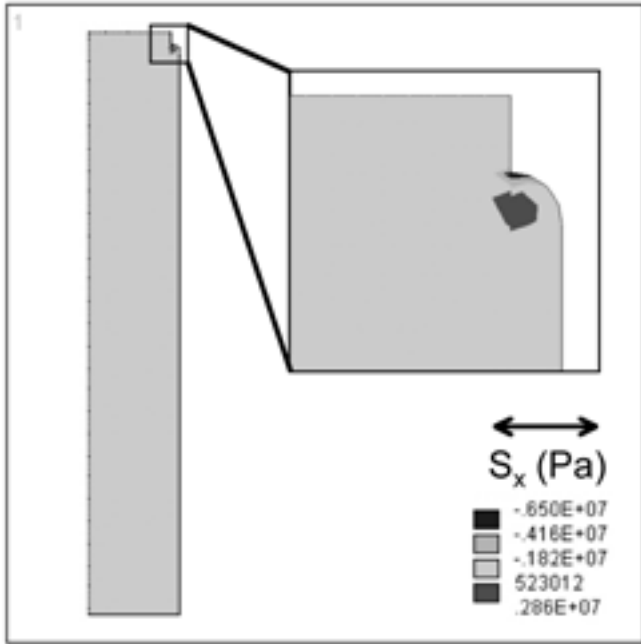


Fig. 6.- Tensiones en la dirección "x" del azulejo común, las compresiones se representan con valores negativos

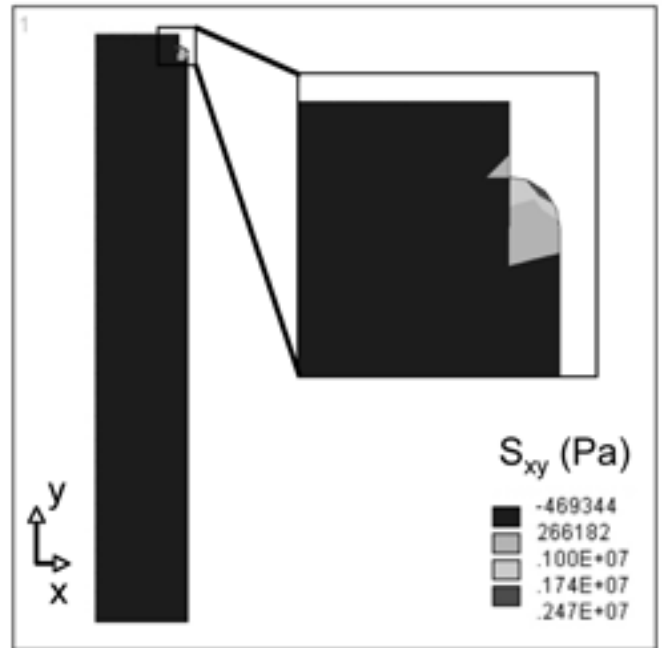


Fig. 8.- Cortante "xy" en el azulejo común

torno a 1 mm de distancia del borde. Un aspecto interesante es que ocurren justo en la frontera entre el vidriado y el bizcocho, lo que explica que en muchas fachadas el vidriado salte del bizcocho en los bordes de los azulejos. El hecho de que las tensiones estén por debajo de la resistencia máxima del vidriado o el bizcocho indica que en los azulejos deben estar presentes microfisuras cuyo crecimiento es promovido por las tensiones. En el caso de las compresiones, éstas llegan a ser aproximadamente dos veces mayores que las tracciones, la compresión máxima es de 6.5 MPa, ocurren entre el vidriado y el bizcocho justo donde el vidriado y el bizcocho se encuentran con el mortero de las llagas, este detalle explica porque es fácil

encontrar azulejos en los que salta la capa de lechada que se deposita en dicha zona.

También en el azulejo común hemos encontrado en la dirección "y" de las tensiones, figura 7, un comportamiento que explica algunos de los fenómenos que toman lugar en las fachadas de azulejos. De forma similar a la dirección "x", las compresiones más altas, la máxima es de 9.14 MPa, se dan en el mismo punto, donde se encuentra el vidriado con el mortero de las llagas. También están presentes compresiones significativas en todo el vidriado, las máximas llegan a 6.84 MPa. Existen tracciones de hasta de 2.35 MPa justo en la frontera entre el vidriado y el bizcocho, a medio milímetro

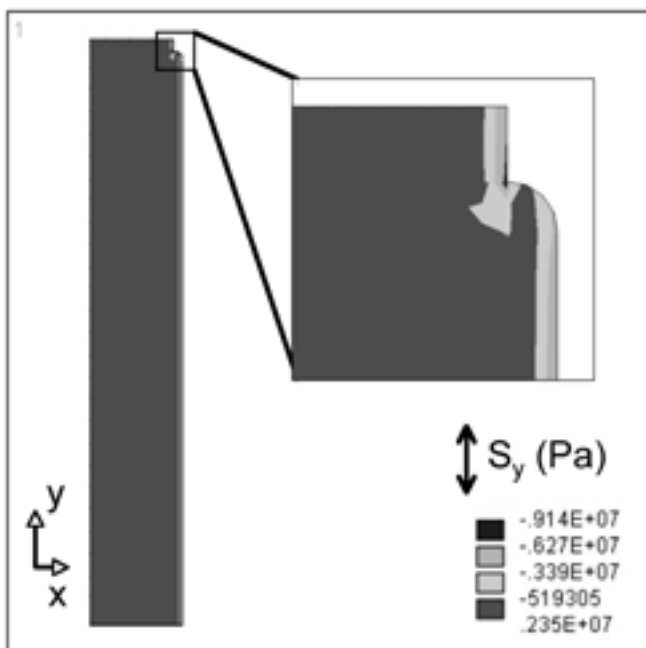


Fig. 7.- Tensiones en la dirección "y" del azulejo común

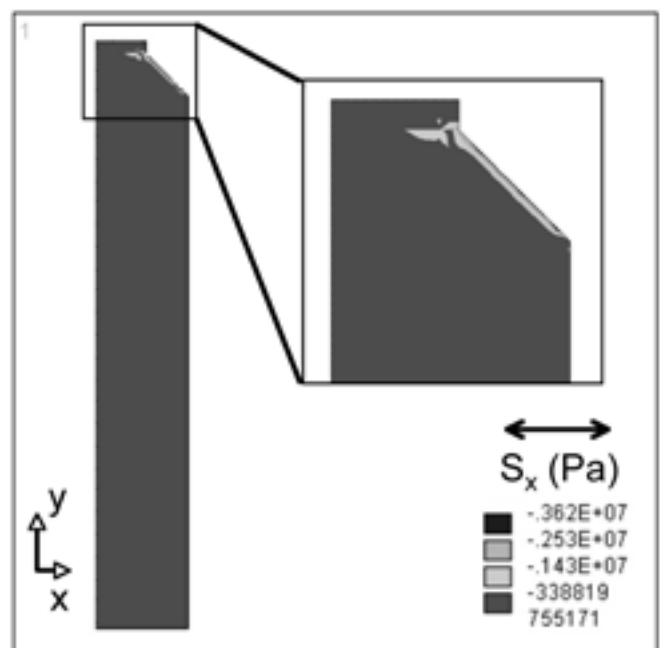
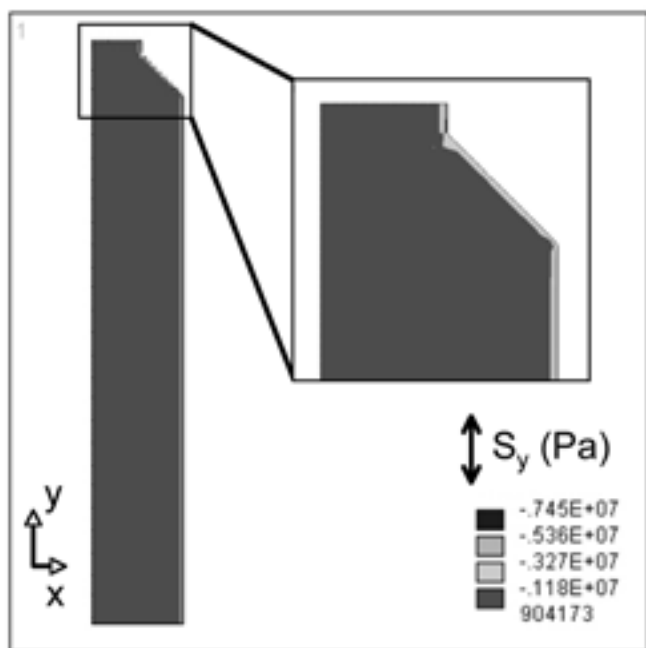
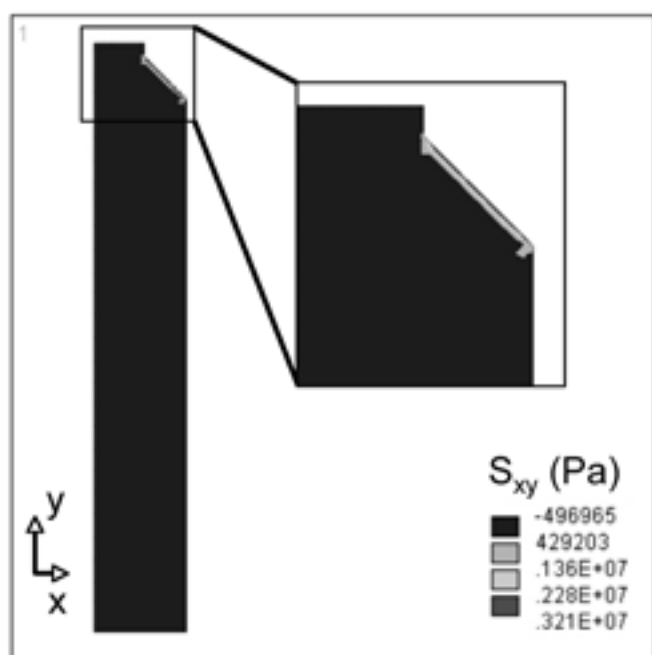


Fig. 9.- Tensiones en la dirección "x" del azulejo con bisel



del borde de los azulejos, lo cual explica que se desprenda el vidriado del azulejo en los bordes ya que dichas tracciones ayudan a la propagación de posibles microfisuras hacia el exterior. Por último, los esfuerzos cortantes más significativos también ocurren en la zona del vidriado más cercana al borde del azulejo, alcanzando un valor máximo de 2.47 MPa, figura 8, ayudando a la propagación de grietas en Modo II de fractura. Dicha zona es donde se encuentran bizcocho, vidriado y lechada, provocando la rotura por desajustes entre los coeficientes de dilatación térmica del mortero, bizcocho y vidriado.



En la segunda geometría estudiada, los azulejos biselados, las tensiones en la dirección "x" más significativas son de compresión, 3.6 MPa, y están localizadas en el vidriado del bisel. Para el caso de la dirección "y", la máxima es también de compresión con un máximo de 7.45 MPa, existiendo compresiones en todo el vidriado y son máximas en la llaga entre azulejos, en la zona más exterior, lo que explica que también en esta geometría salte la lechada entre azulejos.

Si comparamos ambas geometrías, el azulejo biselado desarrolla tensiones tanto en la dirección "x" como en "y" inferiores a las que se dan en el azulejo común, del 20 al 70%. En el caso de la dirección "x", figura 9, las compresiones y las tracciones son inferiores en un 45% y 73% respectivamente. Lo mismo ocurre en la dirección "y", figura 10, donde la reducción es del 18% en compresión y del 60% en tracción. En caso de tomar las tensiones en dirección perpendicular al bisel, estas serían la resultante de las en las direcciones "x" e "y", en la zona en que son máximas las compresiones en dirección "x" no están presentes los valores máximos de la dirección "y", obteniéndose en la dirección perpendicular al bisel valores inferiores, 3.7 MPa. La reducción en las tracciones además de que los máximos, en ambas direcciones, no coincidan en la misma zona del vidriado debido al cambio de geometría, explica que los azulejos biselados no suelen presentar desprendimiento del vidriado aún cuando los cortantes que están presentes sólo en el bisel son un 20% superiores que en el azulejo sin bisel.

En ambas geometrías, las tensiones más altas son de compresión en la zona de las llagas de los azulejos. Estos resultados guardan gran similitud con los obtenidos por Bowman et al. (13). También se debe resaltar que las tensiones más significativas ocurren en el vidriado y que éstas en ningún caso rebasan la resistencia del vidrio, 70MPa. Esto se debe en gran medida a la forma en que se ha planteado el modelo en el cual sólo la superficie más exterior del azulejo está sometida a los 50°C y el interior de la fachada permanece a 20°C.

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha analizado una fachada de azulejos expuesta a altas temperaturas. Se ha encontrado que el problema puede ser fácilmente estudiado mediante un modelo simplificado formado por medio azulejo (bizcocho y vidriado) y el material de agarre ya que la fábrica de ladrillo y las juntas de dilatación pueden ser representadas mediante condiciones de contorno. Se estudiaron dos tipos de azulejos, que se han llamado: azulejo común y tradicional. La geometría tradicional o azulejo biselado desarrolla tensiones significativamente inferiores, tanto en compresión como en tracción, que la geometría del azulejo común.

Es interesante destacar que las tensiones, que son las que promueven el crecimiento de grietas, se reducen significativamente al añadirle un bisel al azulejo. Esto explica porque es más difícil encontrar que el vidriado salte en azulejos de fachada biselados. Con el cambio de geometría las compresiones en el vidriado se concentran en el bisel, estando el resto del azulejo prácticamente libre de tensiones.

Este trabajo sirve como preámbulo a una línea de investigación más profunda sobre fachadas de azulejos. En primer lugar se planteará el problema de transferencia de calor hacia el bizcocho para estudiar el desarrollo de las

tensiones internas. Más adelante se pretende estudiar el sistema mediante otra herramienta numérica, el Método de los Elementos de Contorno, para continuar con el trabajo realizado en la tesis doctoral de Marrero (17), modelando los azulejos cuando éstos poseen una grieta y la temperatura varía en el tiempo, un modelo transitorio.

## BIBLIOGRAFÍA

1. M. Y. L. Chew, *Building facades: a guide to common defects in tropical climates*, Singapore: World Scientific, (Singapur) 1998.
2. A.M. Pitarch Roig, *Reflexiones sobre la utilización de la cerámica arquitectónica en exteriores*, Ponencia no. 77, Congreso Qualicer 2002, Castellón, (España) 2002.
3. O. T. Kim, A.P.J. Alum, *A study of the performance of external wall tiling in Singapore*, International Conference on Building Envelope Systems and Technology, Singapur, December 1994, Centre for Continuing Education, Nanyang Technological University, 214-221, (Singapur) 1994.
4. J. A. Tinker, A. O'Rourke, *Thermal performance of traditional and lightweight mortars used in wall systems*, International Conference on Building Envelope Systems and Technology, Singapur, December 1994, Centre for Continuing Education, Nanyang Technological University, 307-312 (Singapur) 1994.
5. W.L. Zhang, Z.Y. Zhao, L.W. Guan, J. Alum, *Infrared thermography evaluation of external wall tiling*, International Conference on Building Envelope Systems and Technology, Singapur, December 1994, Centre for Continuing Education, Nanyang Technological University, 109-115 (Singapur) 1994.
6. K.S. Tan, L.W. Guan, B.S. Wong, K.C. Chan, *Non-destructive assessments of voids in tiled walls*, International Conference on Building Envelope Systems and Technology, Singapur, December 1994, Centre for Continuing Education, Nanyang Technological University, 91-96 (Singapur) 1994.
7. K. E-A. Van Den Abeele, A. Sutin, J. Carmeliet, P. A. Jonson, *Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy*, NTD&E International vol. 34. (2001) 239-248.
8. K. Yoshikawa, G.G. Litvan, *Thermal stresses in mortar-tile systems*, *Materials and Structures*, 17, 101, 351-357 (1984).
9. J.A. Tinker, A. O'Rourke, *Thermal performance of traditional and lightweight mortars used in wall systems*, International Conference on Building Envelope Systems and Technology, Singapur, December 1994, Centre for Continuing Education, Nanyang Technological University, 307-312 (Singapur) 1994.
10. Z.Y. Zhao, W. L. Zhang, *Influence of workmanship on the bonding strength of tiles to external walls*, *Int. J. Adhesion and Adhesives*, 17 (1997) 47-53.
11. O. C. Zienkiewicz, *The Finite Element Method*, McGraw-Hill, (UK)1977.
12. R. Naniwa, Y. Hayashi, T. Yamazaki, E. Takada, *Study on analysis of differential movement in exterior wall tile installation*, International Conference on Building Envelope Systems and Technology, December 1994, Singapur, Centre for Continuing Education, Nanyang Technological University, 195-202 (Singapur)1994.
13. R. G. Bowman, P. J. Banks, *Theoretical modeling of external wall tiling systems*, International Conference on Building Envelope Systems and Technology, December 1994, Singapur, Centre for Continuing Education, Nanyang Technological University, 73-78 (Singapur) 1994.
14. A. Ramírez de Arellano Agudo, M. Marrero, *Estudio de los efectos de los cambios de temperatura en una fachada de azulejos*, CONTART 2003, Sevilla, I, pp. 311-320, (España) 2003.
15. J. de Cusa, *Colocación de alicatados*, Ed. CEAC (España) 2004.
16. *Materials Engineering, Material Selector 1991*, Ed. Clifford F. Lewis, Penton Publishing, Cleveland, Ohio (EE.UU.) December 1990.
17. M. Marrero, *Estudio Numérico de Problemas Dinámicos Transitorios. Aplicación a la Mecánica de la Fractura*, Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla, (España). Diciembre de 2001.

Recibido: 15.01.05

Aceptado: 26.08.05

